

# Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету

Виктор Лучинин, Юрий Таиров (Санкт-Петербург)

В статье описана история создания и развития отечественного метода производства перспективного материала для полупроводниковой промышленности и специальной техники.

## «Мал золотник, да дорог»

В ведущих электронных державах мира среди материалов полупроводниковой электроники по объёмам экономических вложений в процессы роста кристаллов, получения эпитаксиальных структур и создания приборов силовой электроники, СВЧ-электроники и оптоэлектроники доминируют широкозонные материалы – нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN) и карбид кремния (SiC). Наряду с широкой запрещённой зоной, для них характерна достаточно высокая температура Дебая, которая определяет стойкость материала к внешним воздействиям.

В этом отношении, безусловно, выделяется карбид кремния – алмазоподобный материал, обладающий осо-

бой устойчивостью к радиационным, температурным, химическим и механическим воздействиям. Для SiC также характерна высокая допустимая напряжённость поля электрического пробоя и теплопроводность, превосходящая данный параметр у меди. Близкая к идеальной кристаллохимическая совместимость материалов указанной группы (см. рис. 1) предопределяет возможность создания структурно совершенных гетероэпитаксиальных композиций и твёрдых растворов.

Характерно, что все вышеуказанные материалы относятся к материалам, имеющим ширину запрещённой зоны более 3 эВ (за исключением 2,3 эВ у кубической модификации 3C-SiC). Данные особенности материалов не могли остаться незамеченными ис-

следователями и разработчиками приборов. В области силовой, в том числе быстродействующей электроники, наибольший интерес представляют структуры на основе карбида кремния; в СВЧ-электронике повышенной мощности доминируют композиции GaN/AlN/SiC; в оптоэлектронике особый интерес представляют структуры GaAlN/SiC, обеспечивающие излучение, в том числе в ультрафиолетовой области спектра. Для микросистемной техники важны такие свойства карбида кремния, как твёрдость и теплопроводность, а также наличие пьезоэффекта у нитрида алюминия.

Во многом конечный успех реализации указанной электронной компонентной базы (ЭКБ) определяется решением проблемы подложки, т.е. SiC-субстрата, к которому могут предъявляться различные требования, но главным среди них остаётся стоимость.

Выделим ряд технических требований, предъявляемых к подложкам SiC и определяющих эффективность создания на их основе широкой номенклатуры ЭКБ:

- диаметр 50,8...101,6 мм;
- толщина  $350 \pm 50$  мкм;
- структурная политипная однородность 4Н или 6Н;
- удельное сопротивление  $10^{-3}...10^{12}$  Ом см;
- тип проводимости n-(азот), p-(алюминий);
- плотность дислокаций  $< 10^3$  см<sup>-2</sup>;
- плотность микропор  $< 5$  см<sup>-2</sup>.

Дополнительные требования к подложке могут выдвигаться в отношении качества её предэпитаксиальной подготовки, с учётом реализации процессов эпитаксии SiC или соединений Me<sup>III</sup>N<sup>V</sup>, которые осуществляются, как правило, методом CVD, т.е. осаждением из газовой фазы, или методом MBE – молекулярной эпитаксией в глубоком вакууме. В настоящее время при выполнении определённой совокупности вышеуказанных требований стоимость подложки SiC в среднем составляет не менее 100 долл. США за 1 кв. дюйм.

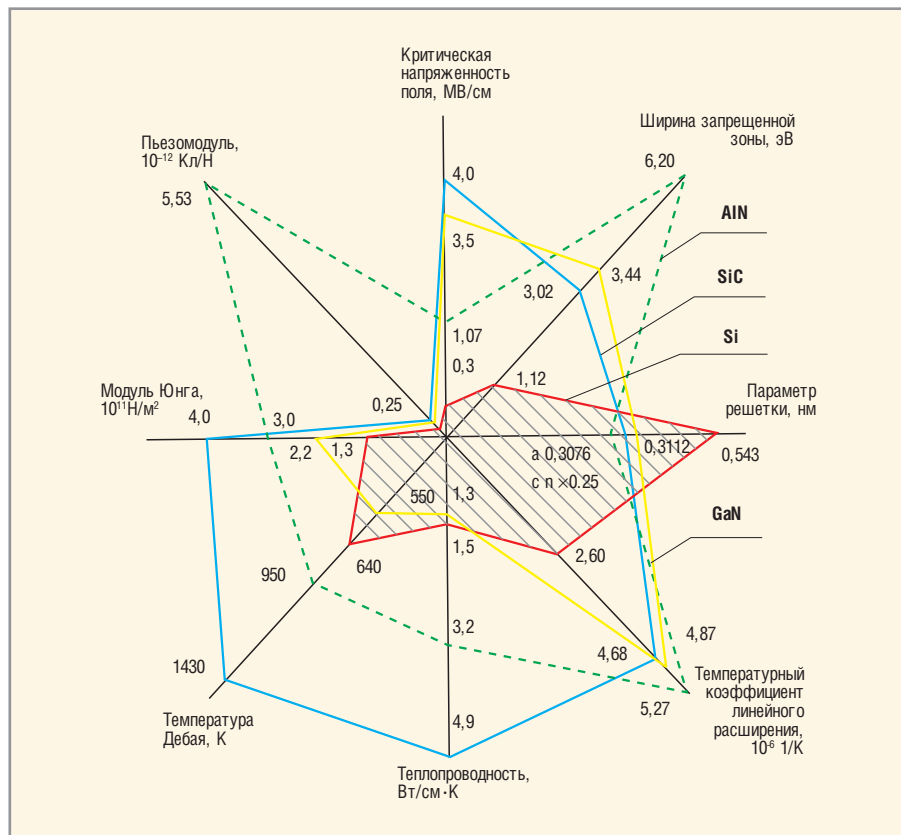


Рис. 1. Сравнение основных свойств материалов электронной техники Si, SiC, GaN, AlN

**От абразива к «ЭКСКЛЮЗИВУ»**

Выращивание монокристаллов карбида кремния для полупроводникового производства представляет собой достаточно сложную техническую задачу. Главной проблемой при получении кристаллов SiC является отсутствие у него жидкой фазы при реально технических достижимых давлениях, а также высокие температуры синтеза (см. рис. 2).

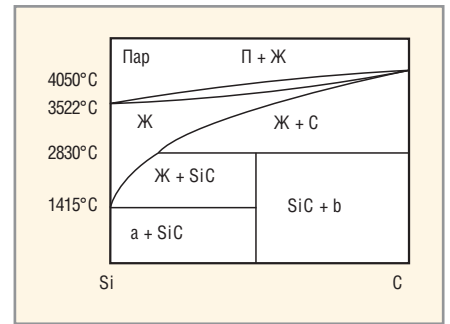
Наиболее распространённым методом выращивания полупроводниковых монокристаллов карбида кремния является метод сублимации, т.е. испарения и конденсации. Этот метод применяется как для получения абразивного материала, так и для выращивания монокристаллов, предназначенных для полупроводниковой электроники. Идея метода довольно проста и основана на переносе материала от горячего источника (шихты) к затравке, находящейся при более низкой температуре. В качестве источника используется шихта, представляющая собой измельчённый карбидокремниевый порошок. Сублимационный рост происходит в диапазоне температур 1800...2600°C. Рисунок 3 иллюстрирует эволюцию методов получения объёмных кристаллов карбида кремния.

Впервые метод сублимации для получения кристаллического материала был предложен в конце XIX в. американским физиком Эдвардом Ачесоном (E.G. Acheson) и используется в настоящее время с небольшими изменениями. Однако, кристаллический карбид кремния, получаемый методом Ачесона для производства абразивов (карборунд), имеет два основных недостатка, препятствующих его использованию в электронике: неконтролируемое структуро- и формообразование кристаллов и их сильное загрязнение.

В 1955 г. голландский физик Лели (J.A. Lely) опубликовал работу [1], являющуюся точкой отсчёта в развитии технологии получения монокристаллов полупроводникового SiC методом сублимации. Кристаллы, выращиваемые по методу Лели, позволили провести исследования фундаментальных свойств карбида кремния и изготовить первые полупроводниковые приборы на этом материале. Вместе с тем метод Лели, как и метод Ачесона, принципиально не позволяет выращивать кристаллы SiC большого размера, пригодного для серийного производства полупроводниковых приборов на SiC.

Комплексные исследования процессов массопереноса, термодинамики процессов в газовой фазе, кинетики кристаллизации и структурообразования политипов [2, 3] при выращивании карбида кремния обеспечили более глубокое понимание особенностей сублимационного роста SiC и сформировали основу нового подхода к синтезу монокристаллических слитков данного бинарного соединения. В 1978 г. профессором Ю.М. Таировым было впервые опубликовано сообщение о разработанном в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ, ныне СПбГЭТУ) методе получения объёмных слитков SiC, пригодных для изготовления приборов [4].

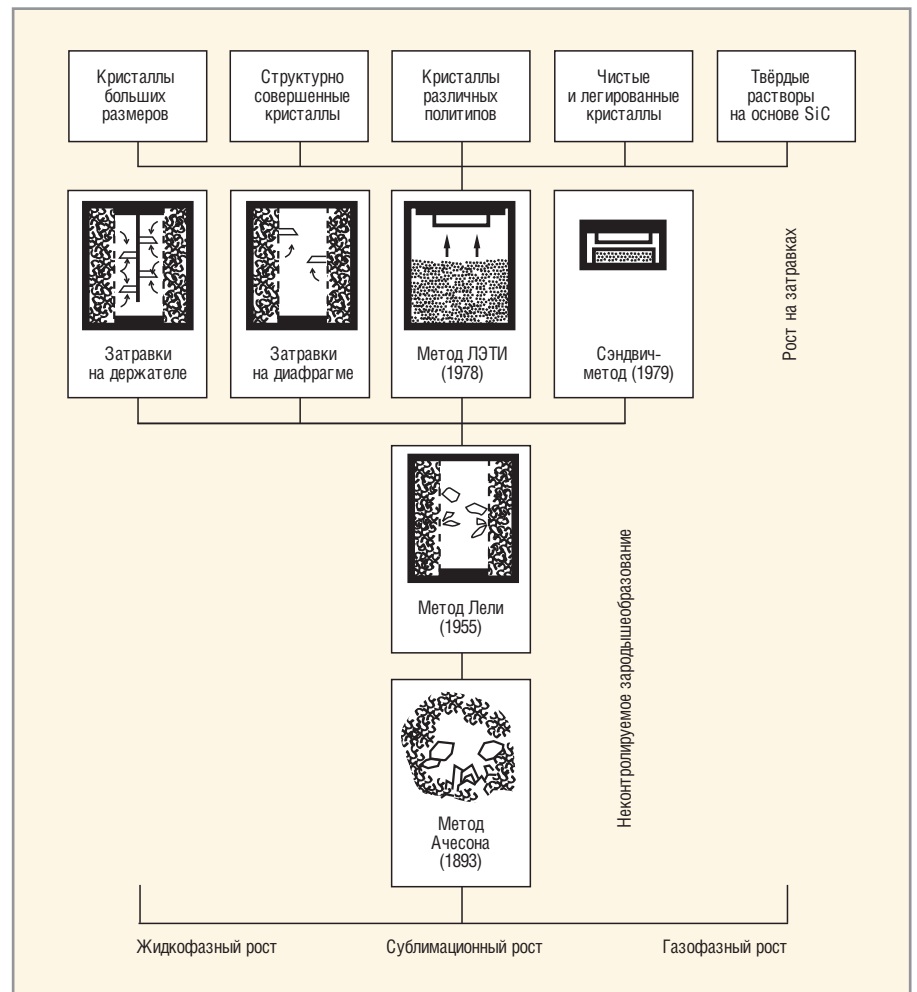
В основу данного метода, получившего название «Метод ЛЭТИ», были положены классическая схема конденсации пересыщенного пара на монокристалл-затравку (для управления процессом зародышеобразования), ограничение на начальном этапе кристаллизации скорости роста путём реализации данной стадии в атмосфере инертного газа (для подавления спонтанного зарождения и образования поликристаллов) и откачка инертного га-



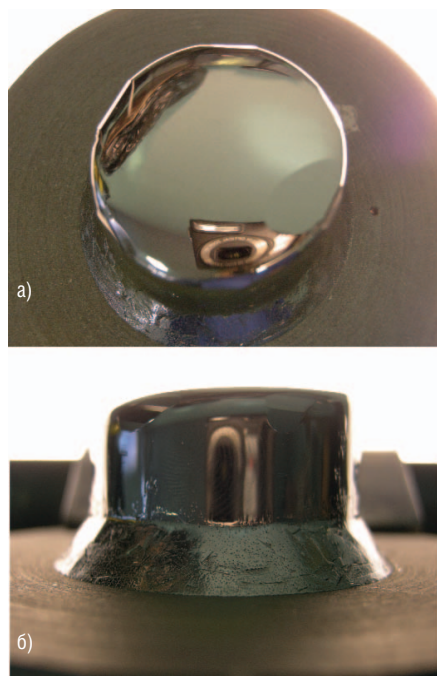
**Рис. 2. Диаграмма состояния карбида кремния**

за из камеры, вплоть до вакуума (для обеспечения постепенного увеличения скорости роста до нескольких миллиметров в час). В качестве затравок использовались монокристаллы Лели, а в качестве источника – поликристаллический карбид кремния, предварительно синтезируемый из кремния и углерода полупроводниковой чистоты.

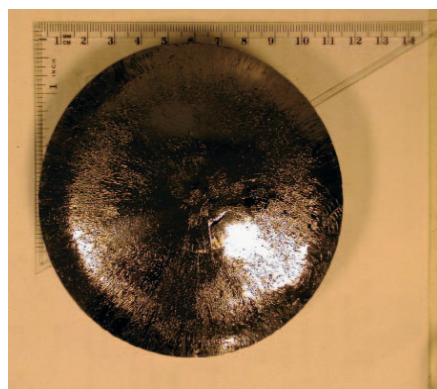
С целью увеличения производительности данного процесса были проведены исследования кинетики массопереноса продуктов испарения исходной шихты. Установлено, что скорость роста слитков SiC зависит не только от скорости испарения самой шихты, но и от дополнительного насыщения паровой



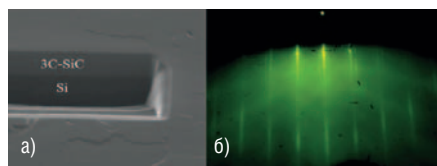
**Рис. 3. Эволюция методов получения объёмных кристаллов карбида кремния**



**Рис. 4. Слитки монокристаллического карбида кремния, выращенного «Методом ЛЭТИ»**  
а) вид сверху, б) вид сбоку

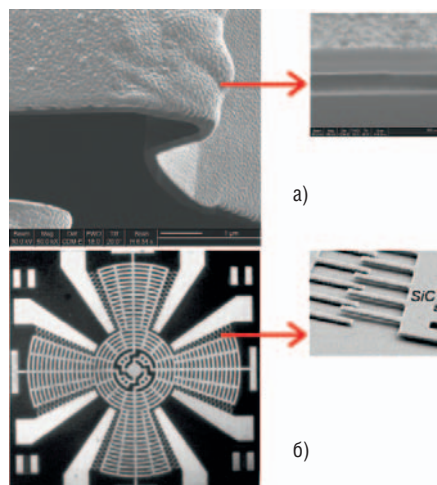


**Рис. 5. Экспериментальный образец слитка SiC диаметром более 100 мм (вид сверху)**

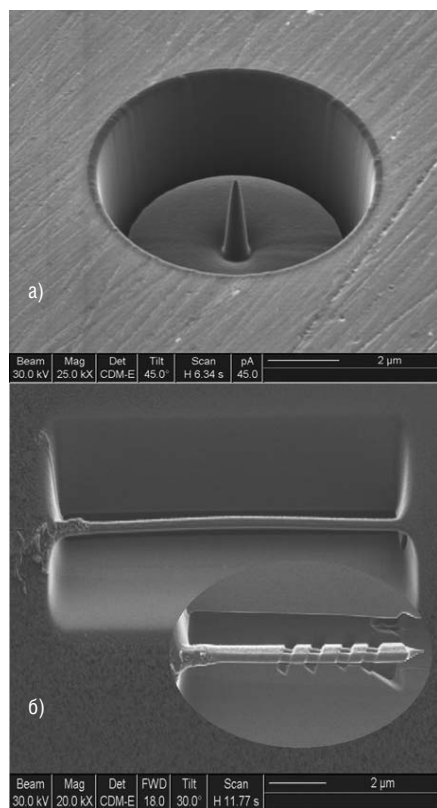


**Рис. 6. SiC поперечное сечение гетероструктуры «карбид кремния на кремнии» (а), и электронограмма поверхности слоя SiC (б), полученного методом конверсии приповерхностного слоя в газовой фазе**

фазы кремний- и углеродсодержащими компонентами за счёт взаимодействия паров кремния (имеющего избыточное давление над карбидом кремния) со стенками графитовой арматуры. Были также определены зависимости скорости роста слитков от температуры и осевого градиента температуры, а также от давления инертного газа в рабочем объёме. Понимание основных закономерностей сублимаци-



**Рис. 7. Элементы конструкции микроэлектромеханических приборов на SiC**  
а) двухслойная гофрированная мембрана SiC-AlN для виброакустического преобразователя;  
б) SiC-микропривод маятника гироскопа



**Рис. 8. Карбидокремниевые катоды для вакуумной эмиссионной электроники**  
а) термоэмиссионный (струна);  
б) автоэмиссионный (остриё)

онного роста привело к разработке конструкции и методики выращивания объёмных монокристаллов SiC больших размеров. В результате дальнейших исследований были выращены слитки карбида кремния диаметром до 100 мм и длиной 60 мм [5].

Сложность ранее рассмотренного процесса выращивания SiC методом сублимации определяется тем, что при температурах роста до 2300°C необхо-

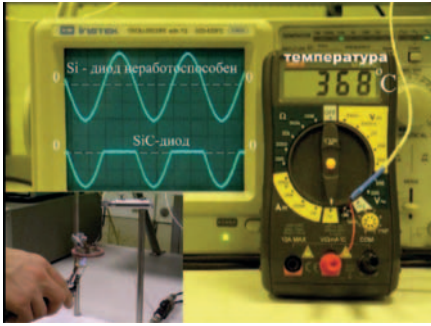
димо осуществлять в реакторе точное регулирование процесса как по температуре, так и по давлению газа. Кроме того, следует контролировать продольные и осевые градиенты температуры и обеспечить низкий уровень загрязнений в оснастке и в шихте, учитывая при этом процессы взаимодействия паровой фазы с материалом тигля и изменение объёма источника в процессе выращивания. Все эти проблемы были в значительной степени преодолены, и сейчас в рамках технологического процесса выращивания слитков карбида кремния, реализуемого в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ», коммерчески доступными являются монокристаллы SiC диаметром 75 мм (см. рис. 4), а в разработке находятся слитки диаметром 100 мм (см. рис. 5). Такие размеры позволяют применять базовые процессы планарной технологии и создавать на основе кристаллов – подложек SiC – различные типы приборов силовой электроники, высокочастотной электроники, оптоэлектроники и микросистемной техники.

### КРЕМНИЕВАЯ АЛЬТЕРНАТИВА КАК ПЕРСПЕКТИВА

В последнее время в рамках развития различных технологических методов конверсии приповерхностного слоя кремниевой подложки [6] предпринимаются серьёзные попытки замены карбидокремниевой подложки на кремниевую. Процесс карбидизации может осуществляться ионной имплантацией углерода в кремний или обработкой поверхности подложки кремния углеродсодержащими газообразными композициями при температурах более 1300°C.

Процесс образования карбидизированного приповерхностного слоя является самоограниченным по толщине, которая, как правило, не превышает десятков нанометров. После чего возможно доращивание слоев SiC и/или Me<sup>III</sup>N<sup>V</sup> традиционным методом CVD. Несмотря на очевидный прогресс в области гетероэпитаксии SiC на кремний, остаются проблемы механических напряжений на границе раздела, невысокого структурного совершенства синтезируемого SiC и его применения в качестве активного материала в силовых и СВЧ-приборах. Неоднозначно решается и проблема политипизма, поскольку на кремнии с базовой ориентацией (100), как правило, доминирует кубический политип 3C-





**Рис. 9. Выпрямляющие свойства карбидокремниевых диодов Шоттки при высокой температуре в сравнении с кремниевыми диодами на основе p-n-переходов**

SiC. На рисунке 6 представлены поперечные сечения полученных в СПбГЭТУ структур SiC-на-Si и электронограммы поверхности таких композиций.

### **КАРБИДОКРЕМНИЕВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ДОРОГО СТОИТ, НО ОНА ЭТОГО СТОИТ**

Освоение промышленного производства карбидокремниевых подложек, а также разработка перспективных конструктивно-технологических решений для реализации электронной компонентной базы силовой электроники, СВЧ-электроники, оптоэлектроники и микросистемной техники на основе карбида кремния (см. рис. 7 – 9) и композиций GaN, AlN, SiC, Si позволит перейти к серийному отечественному производству технически востребованных и коммерчески эффективных ЭКБ нового поколения:

- приборов силовой электроники для эксплуатации в системах с повышенными значениями напряжений (до 4,5 кВ) и плотностей тока (до  $5 \times 10^3$  А/см<sup>2</sup>);
- приборов высокочастотной электроники для эксплуатации в системах с повышенными значениями показателя «мощность-частота» (до  $10^4$  Вт за  $10^{-11}$  с);
- датчиков основных физических величин (температуры, давления, потока, ускорения, вибрации) для эксплуатации в условиях высоких температур (более 400°C), радиации (до  $10^{16}$  нейтронов/см<sup>2</sup>) и агрессивных средах;
- светоизлучающих низковольтных (2...3 В) ресурсосберегающих светотехнических систем.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Lely J.A.* Darstellung von Einkristallen von Siliciumcarbid und Beherrschung von Art

und menge der Eingebauten Verunreinigungen. Ber. Dt. Keram. Ges. 1955. Vol. 32. P. 229.

2. *Кальнин А.А., Лучинин В.В., Нойберт Ф., Таиров Ю.М.* Закономерность эволюции кристаллической структуры при синтезе веществ, обладающих множеством структурно-устойчивых состояний. Журнал технической физики. 1984. Том 54. Вып.7. С. 1388–1390.
3. *Лучинин В.В., Таиров Ю.М.* Гетероэпитаксиальная композиция: редкий политип карбида кремния 2Н на изолирующей подложке: нитрид алюминия-сапфир. Письма в ЖТФ. 1984. Том 10. Вып. 14. С. 873.
4. *Tairov Yu.M. and Tsvetkov V.F.* Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystals. J. Crystal Growth. 1978. Vol. 43. P. 209.
5. *Авров Д.Д., Булатов А.В., Дорожкин С.И., Лебедев А.О., Таиров Ю.М.* Рост слитков карбида кремния политипа 4Н на затравках с плоскостью (10-10). ФТП. 2008. Том 42. Вып. 12. С. 1483–1487.
6. *Мамузов А.В., Ильин В.А., Казак-Казакевич А.З.* и др. Методика эпитаксиального наращивания кубического карбида кремния на кремнии по технологии CVD. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2007. Вып. 3. С. 22–26.